文章编号:1000-4939(2024)02-0453-13

新型装配式梁柱节点有限元参数分析

李慎,丁世豪,李晓蕾,刘云贺,田建勃,王振山

(西安理工大学土木建筑工程学院,710048 西安)

摘 要:提出了一种装配式梁柱节点新形式,带悬臂梁段的框架柱与框架梁进行拼接,通过 L 形角钢进行节点加强,形成全螺栓装配式节点。为研究该节点的力学性能,以前期试验作为研究基础,对带悬臂梁段拼接的装配式新型梁柱节点采用 ABAQUS 软件进行参数分析。首先建立装配式梁柱节点的足尺试验模型,与试验结果进行对比验证;然后,对带悬臂梁段拼接节点进行参数化分析并且考虑加劲肋数量、横板厚度、耳板厚度、L 形角钢长度和翼缘螺栓数量的因素,得到不同参数下节点的力学性能。

关键词:装配式梁柱节点;参数分析;悬臂梁段;力学性能

中图分类号:TU391 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2024.02.019

Finite element parametric analysis of new assembled beam-column joints

LI Shen,DING Shihao,LI Xiaolei,LIU Yunhe,TIAN Jianbo,WANG Zhenshan

(School of Civil Engineering and architecture,Xi'an University of Technology,710048 Xi'an,China)

Abstract:A new form of assembled beam-column joint is proposed,and in order to study the mechanical properties of this joint,the parametric analysis of the assembled new beam-column joint with cantilever beam segment splicing is carried out by ABAQUS software on the basis of the preliminary experimental research. First,the test model of the assembled beam-column joint was established by ABAQUS,and the test results were compared and verified. Then,the parametric analysis of the spliced joint with cantilevered beam segments was carried out and the mechanical properties of the joint under different parameters were obtained by considering the number of stiffening ribs,thickness of cross-plate,thickness of plates,and length of L-shaped angle steel.

Key words:assembled new beam-column joint;parametric analysis;cantilever beam;mechanical property

抗弯钢框架仅有梁、柱两种构件,空间功能布置灵活,被广泛应用于多高层钢结构建筑中,影响钢框架整体抗震性能的主要因素为梁柱节点的传力性能。传统钢框架节点设计需满足承载力设计,通常

收稿日期:2022-04-20 修回日期:2022-11-18
基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(No. 2021JM-330;2022JM-220)
通信作者:李慎。E-mail:lishen2861@163.com
引用格式:李慎,丁世豪,李晓蕾,等. 新型装配式梁柱节点有限元参数分析[J]. 应用力学学报,2024,41(2):453-465.
LI Shen,DING Shihao,LI Xiaolei,et al. Finite element parametric analysis of new assembled beam-column joints[J]. Chinese journal of applied mechanics,2024,41(2):453-465.

设计成完全刚性节点,如全焊节点和栓焊节点形式,栓焊节点具有刚度大、承载能力高的优点。但是,节点根部的焊接残余应力和缺陷导致该节点在大震作用下转动能力不足,延性较差,北岭地震和阪神地震中,很多钢框架结构倒塌均由节点处焊缝脆断引起[1-3]。因此,研究学者提出了传统刚性连接节点的解决思路,如半刚性节点、翼缘加强型节点、翼缘削弱型节点、腹板削弱型节点、节点配置耗能装置等[4-12]。其改进思路均为加强节点区域的承载能力,使得节点的塑性铰外移,避免在节点根部出现。改进的各类节点形式在保证有一定的刚度和承载力基础上,充分发挥了节点的转动能力,保证框架有充足的延展性和耗能性能。

装配式钢结构建筑具有构件生产工厂化、现场施工机械化、组织管理科学化,具有建造速度快、建设周期短、易于把握建筑质量、资源利用率高、节能环保等特点[13]。自十三五以来,国家大力推行绿色建筑的工程应用和研发,钢结构因自身具备装配化建造的天然优势,得到研究学者的青睐[14]。针对钢框架结构,许多学者研究了预制装配式节点形式,如模块化全螺栓连接节点、可变梁高装配式梁柱节点、带悬臂梁段的装配式节点、端板式梁柱连接节点等多种形式[15-21]。本研究在装配化的思路上,提出了一种新型装配式梁柱节点:框架柱带悬臂梁段(牛腿),便于钢梁的拼接安装,上翼缘通过 L 形角钢加强,形成全螺栓装配式梁柱节点,装配化过程见图 1。符合"标准化设计、工业化生产、装配式建设"的绿色建筑思路,最大程度实现工厂内量产,缩减现场施工,提高工艺水平。在前期足尺试件的拟静力试验研究基础上,本研究通过 ABAQUS 有限元软件对节点进行参数敏感性分析,对该新型装配式梁柱节点的设计提供建议。

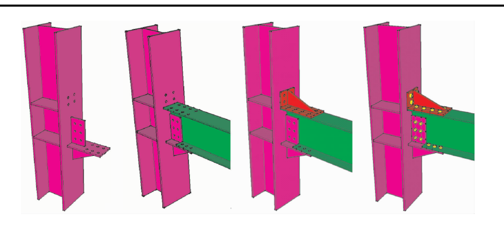


图 1 装配式钢结构节点组装过程

Fig. 1 Assembly process of assembled steel structure joints

1 试验模型

新型装配式梁柱节点足尺试件设计框架梁长度为 1 600 mm,框架柱长度 2 216 mm。钢材均为 Q235B,柱截面为 HW400 × 400 × 13 × 21,梁截面为 HN400 × 200 × 8 × 13。带悬臂梁段拼接的装配式新型节点几何尺寸及构造见图 2 ~ 3。试验共设计了 4 个带悬臂梁段拼接的装配式梁柱节点足尺试件,试件 XBL-3 为基础,设计了 L 型角钢短肢长度 216 mm 和 176 mm 的两个试件,分别编号为 XBL-1、XBL-3;设计悬臂梁段双加腋和单加腋两个试件,分别编号为 XBL-2、XBL-3。设计梁柱强轴连接和梁柱弱轴连接两个试件,分别编号为 XBL-3、XBL-4。试件各项参数见表 1。

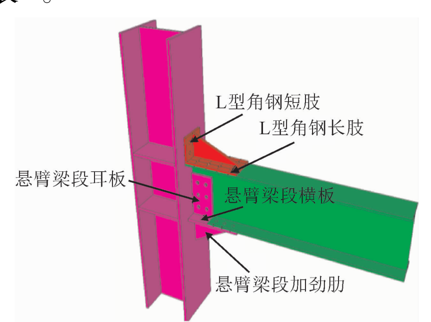


图 2 带悬臂梁段的装配式梁柱节点

Fig. 2 Assembled beam-column joint with cantilevered beam sections

表 1 试件设计

Tab. 1 Test specimens

试件编号		柱截面/mm	梁截面/mm	L 型短肢高度/mm	加劲形式
强轴	XBL-1	400 × 400 × 13 × 21	400 × 200 × 8 × 13	216	单加腋
	XBL-2	400 × 400 × 13 × 21	400 × 200 × 8 × 13	176	双加腋
	XBL-3	400 × 400 × 13 × 21	400 × 200 × 8 × 13	176	单加腋
弱轴	XBL-4	400 × 400 × 13 × 21	400 × 200 × 8 × 13	176	单加腋

试验装置包括带悬臂梁段拼接节点、反力装置、侧向支撑结构、测试装置与加载装置。根据场地及设备条件,采用梁端加载方式,即柱横放梁竖放水平加载的形式进行试验,试验加载装置见图 4。柱顶轴向荷载由安装在左固定支座上的 1 000 kN 液压千斤顶施加。梁端水平荷载由架设在反力墙上 1 000 kN

的 MTS 作动器施加；柱顶轴向荷载由安装在固定支座上的液压千斤顶施加。首先在柱顶施加 1 000 kN 的轴向荷载(按轴压 0.2 计算)，再在梁端施加水平荷载，水平荷载参考美国规范 AISC/ANSI341-10，以梁端转角作为控制参数进行加载。当层间位移角 $\theta < 0.01$ rad(θ 为 0.003 75、0.005、0.007 5 rad)时，每级荷载循环 6 次；当层间位移角 $\theta = 0.01$ rad 时，每级荷载循环 4 次；当层间位移角 $\theta > 0.01$ rad 时，每级循环 2 次，且当 $\theta \geqslant 0.02$ rad 时，每级增量为 0.01 rad，加载制度如图 5 所示。试验现象及具体设计尺寸见相关文献[22]。

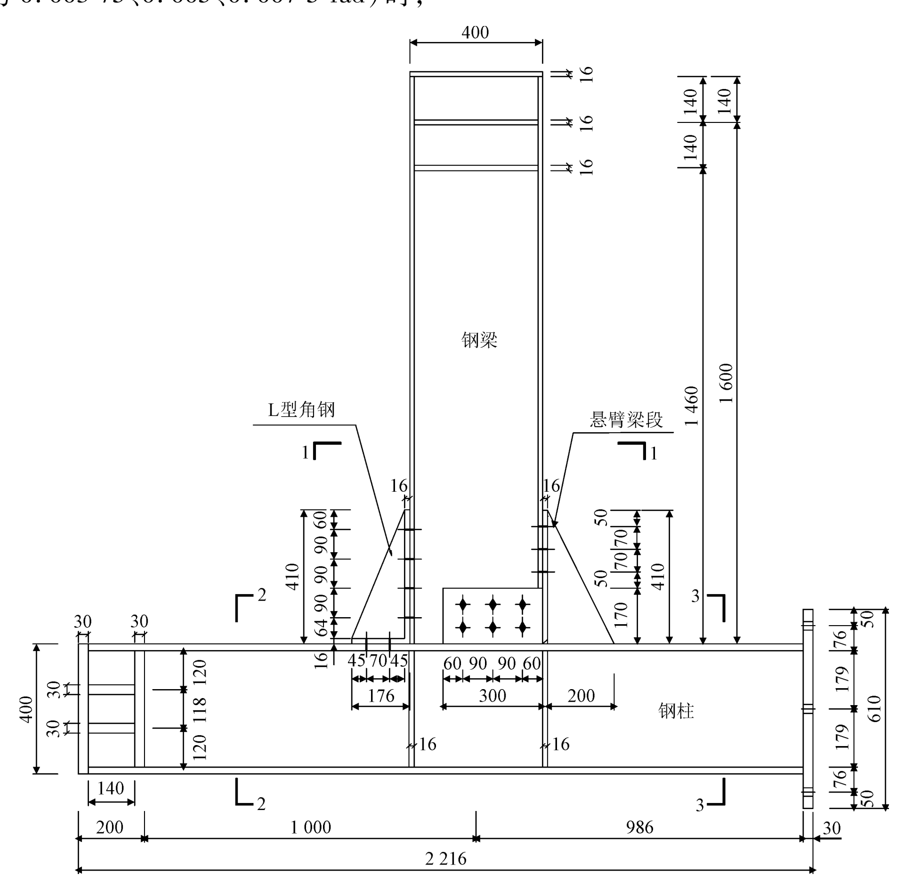


图 3　试件尺寸

Fig. 3　Size of specimen

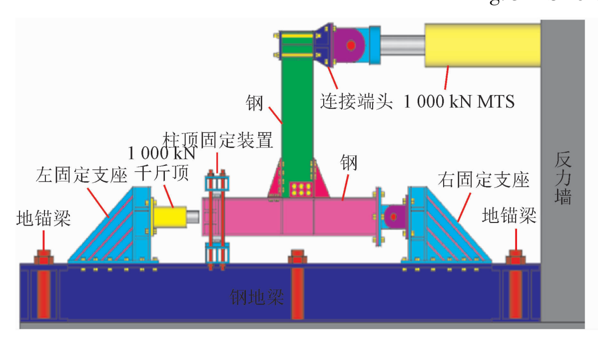




图 4　加载装置

Fig. 4　Test setup

每种钢板厚度的材性试件取取 3 个试件，共 12 个试件。材性试件取样及加工符合《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》(GB 2975—2018)[23]的要求，材性试验按照《金属材料拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)[24]的规定进行单向拉伸试验。各试件测试结果平均值见表 2。各种厚度的钢板屈强比处于 0.57 ~0.64 之间，屈强比小于 0.85，钢材断后伸长率处于 28% ~36% 之间，远远大于 20%，满足规范要求。

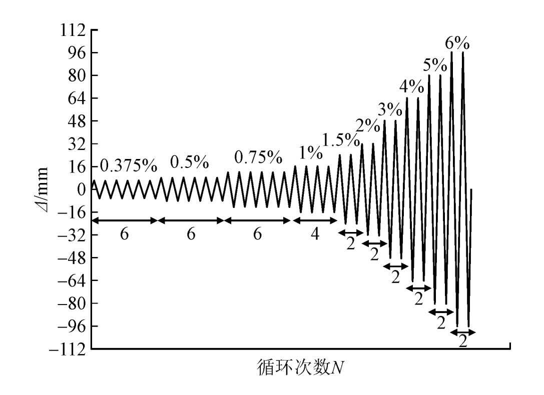


图5 加载制度

Fig. 5 Loading protocol

表2 材性试验结果

Tab. 2 Material test results

截取位置	板厚 t/mm	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	弹性模量 E/GPa	伸长率 δ/%	屈强比 f_y/f_u
梁翼缘	13	278.9	440.6	204.6	29.8	0.63
梁腹板	8	261.5	461.1	203.3	28.1	0.57
柱翼缘	21	252.8	440.5	206.2	33.9	0.57
柱腹板	13	278.9	440.6	204.5	29.8	0.63
钢板	16	259.4	402.8	208.7	36.6	0.64

2 有限元模型验证

有限元模型采用C3D8R实体单元,在有限元模型装配过程中,主要分为3个模块,带悬臂梁段的H型钢柱、框架梁、L型角钢。在节点有限元模型中,螺栓杆与孔壁、栓帽与柱翼缘、梁翼缘、梁腹板、悬臂梁段耳板、悬臂梁段横板都存在接触。为了更加准确的模拟各部件之间的接触关系,相互接触部位皆有接触对,来防止互相侵入。在试件连接凡是焊接的部位,均采用绑接约束,忽略钢材因焊接产生的残余变形及应力集中。材性数值取实际材性试验结果,如表2所列。

有限元模型的边界条件与试验一致,将沿梁长度方向设置为Y方向,柱高度方向设置为X方向,对柱子梁端的端板进行X方向上的耦合,并在耦合约束点上设置固定约束,并且在柱子左端耦合点施加轴压比为0.1的竖向荷载1 000 kN;对梁端横截面采用耦合作用面的方式施加X轴低周往复荷载,研究节点的受力性能。为防止出现面外失稳,对梁施加侧向约束,边界条件如图6所示。

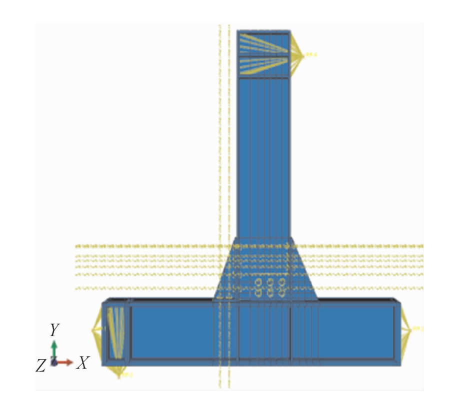


图6 约束与边界条件

Fig. 6 Constraints and boundary conditions

网格划分对模型的收敛情况有直接的影响。为确保模型分析的运算效率及正确性(准确性),网格皆选用六面体结构去划分,在节点域部分适当的进行网格加密处理,剩余部分选用稀疏网格划分,带悬臂梁段H型钢柱、H型钢梁全尺寸30 mm,节点核心区进行适当加密,取20 mm,L型角钢取15 mm,螺栓取5 mm,试件网格划分见图7。有限元模型的网格数和结点数量分别在2 000和4 000左右。

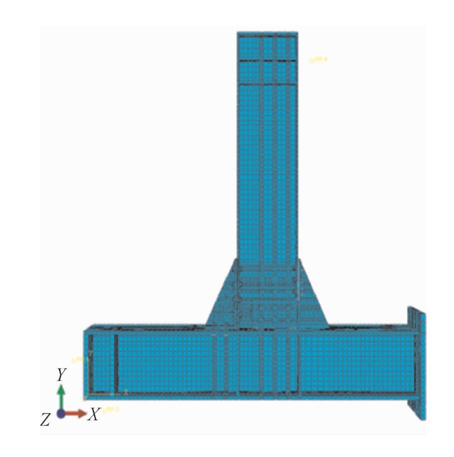


图7 有限元模型

Fig. 7 Finite element model

在试验加载过程中,带悬臂梁段拼接的装配式新型梁柱节点破坏模式基本一致,故本研究选取典型试件XBL-3的有限元分析结果与试验进行对比分析,如图8所示。为了与试验结果进行更直观的对比分析,将试件有限元分析和试验研究的破坏模式进行并列展示。结果表明:二者分析所得试件的受力破坏模式基本一致,在试验加载过程中试件受力最大的部位也是有限元分析中试件所受应力最大处,且二者试件屈曲部位以及试件变形大小也基本吻合,进一步验证了有限元分析的准确性和可靠性。

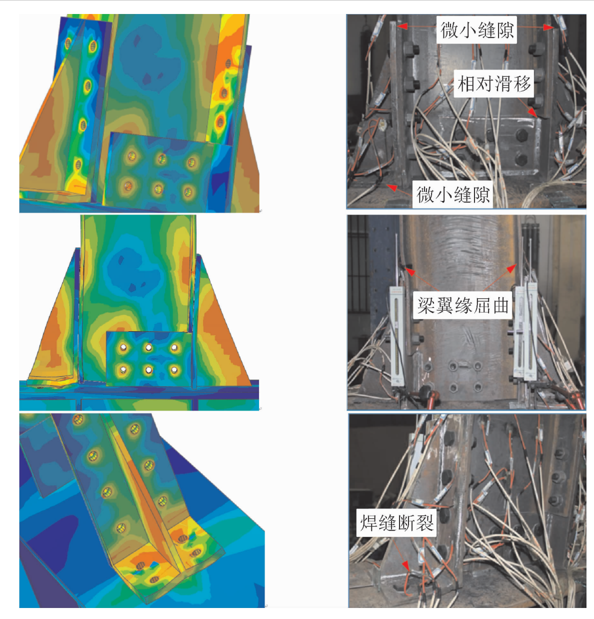


图 8　试件 XBL-3 有限元分析分析与试验结果破坏模式对比

Fig. 8　Failure modes comparison of specimen XBL-3 FEA analysis and test results

图 9 为带悬臂梁段拼接的装配式新型梁柱节点试件 XBL-1 ~ XBL-4 试验和有限元滞回曲线对比。有限元模拟的弯矩-转角曲线形状、饱满程度和试验所得结果基本保持一致,其滞回曲线与试验研究所得滞回曲线大体相符,呈饱满的梭形,但是未出现明显的捏缩迹象。由于有限元分析有效地消除了试验进程中滑移的影响,造成其滞回曲线没有显著的捏缩效应。总体来说,有限元分析方法以及选取的材料参数和本构模型基本上能够反映试验加载过程中各个试件的实际受力情况,进一步验证了有限元模拟结果的准确定和可靠性。

带悬臂梁段拼接的装配式新型梁柱装配式节点试件 XBL-1 ~ XBL-4 试验与有限元骨架曲线对比如图 10 所示。由图 10 可知:有限元计算与试验所得弯矩-转角骨架曲线基本一致,二者的形状和走势吻合较好,有限元分析过程中试件的承载力高于试验研究值,表明有限元对节点弹塑性阶段的受力性能模拟存在误差,因为有限元分析过程中忽略了节点的焊接残余应力、构件初始偏心、焊缝初始缺陷等不利因素的影响,使材料位于理想状态,因此节点的受力性能能够充分发挥。

(a) XBL-1

(b) XBL-2

(c) XBL-3

(d) XBL-4

图 9　各试件滞回曲线对比

Fig. 9　Comparison of hysteresis curves for each specimen

而在试验过程中,试件本身材料及加工过程会对材料造成初始缺陷,因此有限元分析所得滞回曲线更加饱满。另外,在进行有限元分析时,螺栓的本构参数取值为 $\sigma_y = 830$ MPa, $\sigma_u = 830$ MPa, $E = 206$ MPa,

梁柱翼缘、腹板与螺帽之间接触摩擦系数取为0.4。在低周往复荷载作用下，由于螺栓的实际材性存在偏差，螺栓实际屈服强度可能偏小，从而产生更大的塑性变形，造成螺栓连接的板件之间出现较大的空隙，使得试验曲线出现较为显著的捏拢现象。进行有限元分析时选择合适的应力-应变关系曲线以及单元类型，可以对试验进行可靠的模拟。

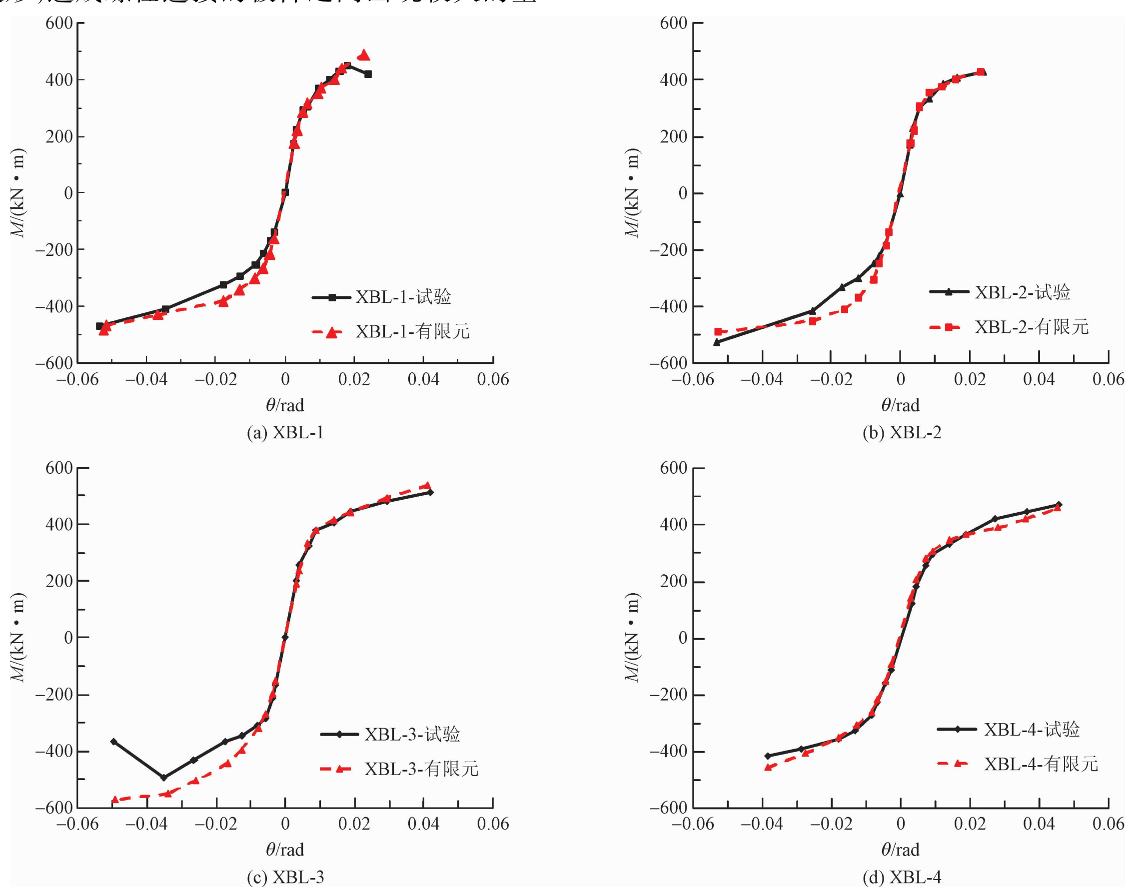


图10 各试件骨架曲线对比

Fig. 10 Comparison of skeleton curves for each specimen

根据带悬臂梁段拼接节点有限元分析所得到的骨架曲线，计算得各节点试件抗震性能指标见表3。通过有限元分析所得到的各个阶段的弯矩值和转角值与试验值存在一定的误差，试件XBL-1在试验加载过程中，存在面外失稳现象，尤其是在峰值点处其转角值误差较大。试件XBL-3在试验负向加载过程中受焊缝断裂的影响，其承载力有下降趋势，造成有限元分析值和试验值有较大的不同。总体来看，有限元结果与试验结果基本吻合，说明利用ABAQUS能够模拟出带悬臂梁段拼接的装配式新型梁柱节点的受力性能。

表3 带悬臂梁段拼接的梁柱节点位移延性系数

Tab. 3 Displacement ductility coefficient of beam-column joints splice with cantilevered beam segments

试件编号		加载方向	屈服点		峰值点		极限点	
			M_y/(kN·m)	θ_y/(10^2 rad)	M_{max}/(kN·m)	θ_{max}/(10^2 rad)	M_u/(kN·m)	θ_u/(10^2 rad)
XBL-1	试验	正向	305.24	0.68	445.70	1.44	420.14	2.39
		负向	−276.50	−1.13	−468.01	−5.36	−468.01	−5.36
	FEA	正向	325.17	0.74	486.45	2.29	486.45	2.29
		负向	−312.50	−0.99	−483.12	−5.23	−483.12	−5.23
	δ/%	正向	6.53	8.82	9.14	59.03	15.78	4.18
		负向	13.02	12.75	3.23	2.43	3.23	2.43

续表 3

试件编号		加载方向	屈服点		峰值点		极限点	
			M_y/(kN·m)	θ_y/(10^2 rad)	M_{max}/(kN·m)	θ_{max}/(10^2 rad)	M_u/(kN·m)	θ_u/(10^2 rad)
XBL-2	试验	正向	322.80	0.72	429.01	2.39	429.05	2.39
		负向	-283.51	-1.08	-527.24	-5.33	-527.24	-5.33
	FEA	正向	334.43	0.71	543.60	2.33	543.60	2.33
		负向	-358.21	-1.14	-571.46	-5.23	-571.46	-5.23
	δ/%	正向	3.60	1.39	26.71	2.51	26.70	2.51
		负向	26.35	5.56	8.39	1.88	8.39	1.88
XBL-3	试验	正向	355.01	0.80	511.08	4.18	511.08	4.18
		负向	-313.25	-0.89	-492.07	-3.52	-418.26	-4.70
	FEA	正向	370.75	0.84	543.60	4.33	543.60	4.33
		负向	-358.25	-1.04	-571.46	-4.91	-571.46	-4.91
	δ/%	正向	4.43	4.74	6.36	3.59	6.36	3.59
		负向	14.37	16.13	16.13	39.49	36.63	4.47
XBL-4	试验	正向	314.50	1.17	471.44	4.58	471.44	4.58
		负向	-306.25	-1.16	-417.22	-3.86	-417.22	-3.86
	FEA	正向	310.86	1.28	460.99	4.53	494.42	4.49
		负向	-322.58	1.08	-455.00	-3.83	-491.56	-3.89
	δ/%	正向	1.15	0.74	2.22	0.89	4.87	1.97
		负向	5.33	0.00	9.06	0.67	17.82	0.78

3　有限元参数扩展分析

介于实际试验过程中试验条件的限制,无法充分考虑各个因素对该节点受力性能的影响,因此应用 ABAQUS 软件对带悬臂梁段拼接的装配式新型梁柱节点进行变参数分析,确定不同参数关于该新型节点抗震性能的影响,从而为带悬臂梁段拼接节点提供可行性设计建议。节点主要考虑的参数有:悬臂梁段加劲肋的数量、悬臂梁段横板厚度、悬臂梁段耳板厚度、L 型角钢厚度和梁翼缘螺栓数量。

3.1　悬臂梁段加劲肋(SRCB)

为分析悬臂梁段加劲肋的数量对节点抗震性能的影响,基于标准试件(SRCB-1),只改变带悬臂梁段加劲肋的数量,即:无加劲肋、单加劲肋(标准件)、双加劲肋。SRCB 系列试件弯矩-转角曲线见图 11。

从图 11 可知,悬臂梁段加劲肋的数量对节点的抗震性能有一定的影响。试件 SRCB-0 由于缺少悬臂梁段加劲肋,试件整体抗震性能低于试件 SRCB-1 和 SRCB-2,说明悬臂梁段加劲肋的有无对节点的抗震性能有着重要影响。试件 SRCB-2 虽为带悬臂梁段双加劲肋,但是其整体抗震性能与 SRCB-1 相差不大,悬臂梁段双加劲肋其位置处于悬臂梁段横板两侧,与梁下翼缘进行拼接时,其位置并未与梁腹板处在同一平面存在偏心,故导致节点整体的抗震性能较低于试件 SRCB-1。总体而言,对于加载初期 SRCB 系列试件骨架曲线大体一致,表明悬臂梁段数量对试件前期刚度以及承载力影响较小。当进入屈服阶段以后,骨架曲线逐渐产生分离,试件 SRCB-1 抗震性能优于其余两个试件,其承载力相对于试件 SRCB-0 和 SRCB-2 分别提高 10.04% 和 0.82%。

(a) 试件SRCB-0

(b) 试件SRCB-1

(c) 试件SRCB-2

(d) 试件SRCB系列骨架曲线

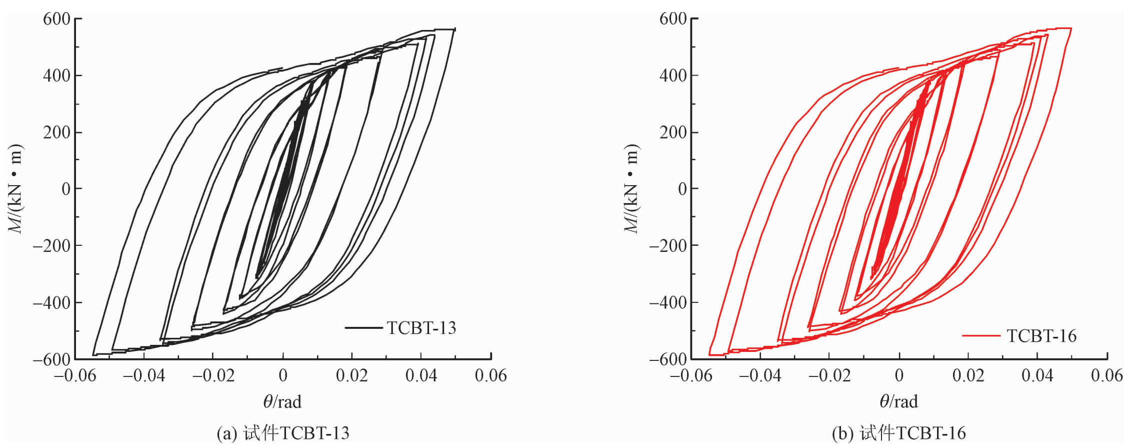
图 11　SRCB 系列试件弯矩-转角曲线

Fig. 11　SRCB series specimen bending moment-rotation curves

3.2　悬臂梁段横板厚度(TCBT)

为分析悬臂梁段横板厚度对节点抗震性能的影响,基于标准试件(TCBT-16),只改变带悬臂梁段横板厚度并且分别取横板厚度为 13 mm 和 21 mm。鉴于带悬臂梁段拼接的装配式新型梁柱节点对梁下翼缘靠近主翼缘的部位被切除,悬臂梁段横板等同于部分已经切除的部位,使得悬臂梁段横板厚度对节点的受力性能产生较大影响。在基本模型的基础上,分别取横板厚度为 13 mm 和 21 mm 进行有限元分析。TCBT 系列试件弯矩-转角曲线见图 12。

由图 12 可知,改变悬臂梁段横板厚度对节点的受力性能影响较小,不同悬臂梁段横板作用下的各试件弯矩-转角曲线基本重合,曲线走势发展保持一致。不同横板厚度节点试件的承载力相差较小,差值在 0.5% 以内。因此,改变悬臂梁段横板厚度对节点的整体受力性能影响微小。



(a) 试件TCBT-13

(b) 试件TCBT-16

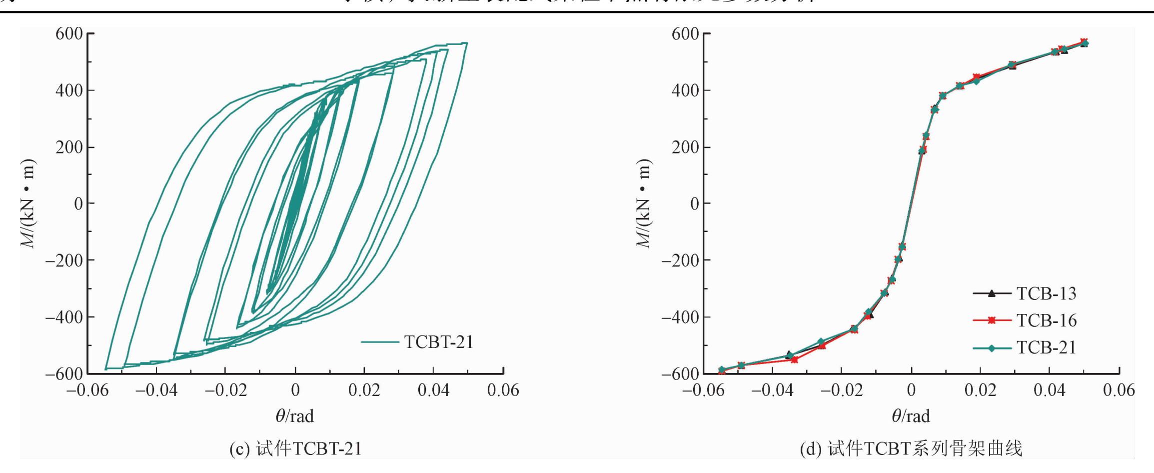


图 12　TCBT 系列试件弯矩-转角曲线

Fig. 12　TCBT series specimen bending moment-rotation curves

3.3　悬臂梁段耳板厚度(TCBE)

为分析悬臂梁段耳板厚度对节点抗震性能的影响,基于标准试件(TCBE-16),只改变带悬臂梁段耳板的厚度,分别取耳板厚度为 8 mm 和 13 mm。TCBE 系列试件弯矩-转角曲线见图 13。

(a) 试件TCBE-8

(b) 试件TCBE-13

(c) 试件TCBE-16

(d) 试件TCBE系列骨架曲线

图 13　TCBE 系列试件弯矩-转角曲线

Fig. 13　TCBE series specimen bending moment-rotation curves

根据图 13 可得,随着带悬臂梁段耳板厚度的增大,TCBE 系列试件各承载力虽呈上升趋势,但是区别不是很明显,各试件极限承载力差值在 0.7% 以内。鉴于试件在悬臂梁段端头截面处破坏;耳板作为连接柱、梁及加强梁腹板的作用,其距破坏处 240 mm左右,由此,节点承载力受悬臂梁段耳板厚度的影响较小。

3.4 L型角钢厚度(TLC)

旨在探究L型角钢厚度对节点抗震性能的影响。基于标准试件(TLC-16-16),只改变L型角钢的厚度。以试件TLC-13-16为例,其含义为:TLC-13-16代表L型角钢水平板厚度为13 mm,竖板厚度为16 mm。

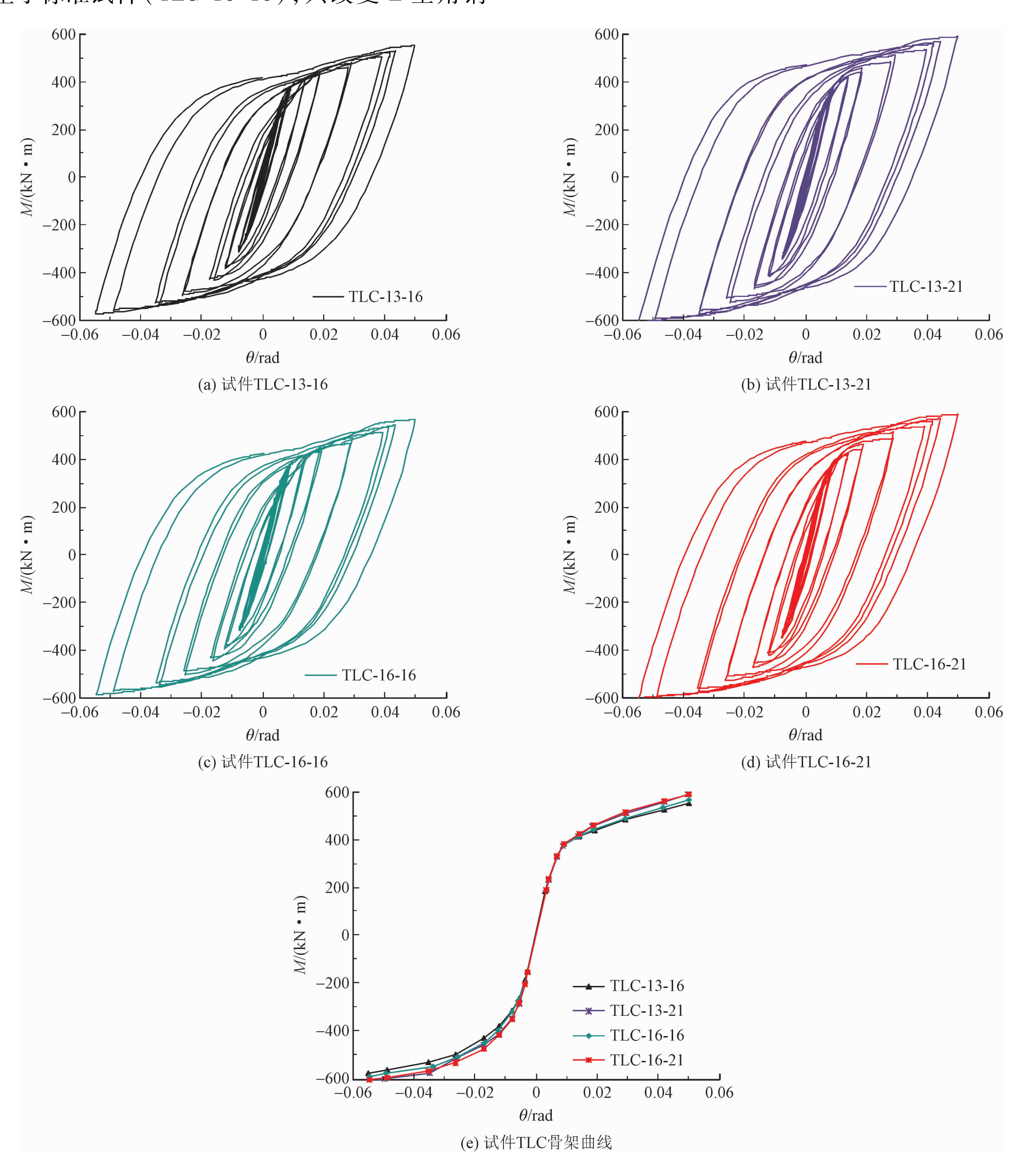


图14 TLC系列试件弯矩-转角曲线

Fig. 14 TLC series specimen bending moment-rotation curves

在验证模型的基础上,分别取不同的L型角钢厚度进行有限元分析。TLC系列试件弯矩-转角曲线见图14。节点的承载力随着的L型角钢厚度的不同而显著变化。对比试件TLC-13-16与TLC-16-16,试件TLC-13-16极限承载力比试件TLC-16-16低2.56%,可见提高水平板厚度对提高试件的承载力有较大意义。分析其原因L型角钢水平板的作用在于加强梁上翼缘,与之一起受力,因此提高L型角钢长肢厚度对节点的承载力贡献较大。对比试件TLC-16-16与试件TLC-16-21,试件TLC-16-21承载力比试件TLC-16-16高2.79%,可见提高试件的竖板厚度对其承载力也有着较大影响。总体而言,提

高 L 型角钢厚度对提高节点整体的抗震性能有着重要意义。

3.5 梁翼缘螺栓(BBF)

为分析梁上、下翼缘螺栓数量和节点抗震性能之间的关系,根据标准试件,只改变上、下翼缘螺栓数量。以试件 BBF-4-3 为例,其含义为:梁上翼缘与 L 型角钢长肢连接的螺栓数量为 4 排(8 个),梁下翼缘与悬臂梁段横板连接的螺栓数量为 3 排(6 个)。

在验证模型的基础上,分别取不同的上、下翼缘螺栓数量进行有限元分析。表中 BBF 系列试件弯矩-转角曲线见图 15。

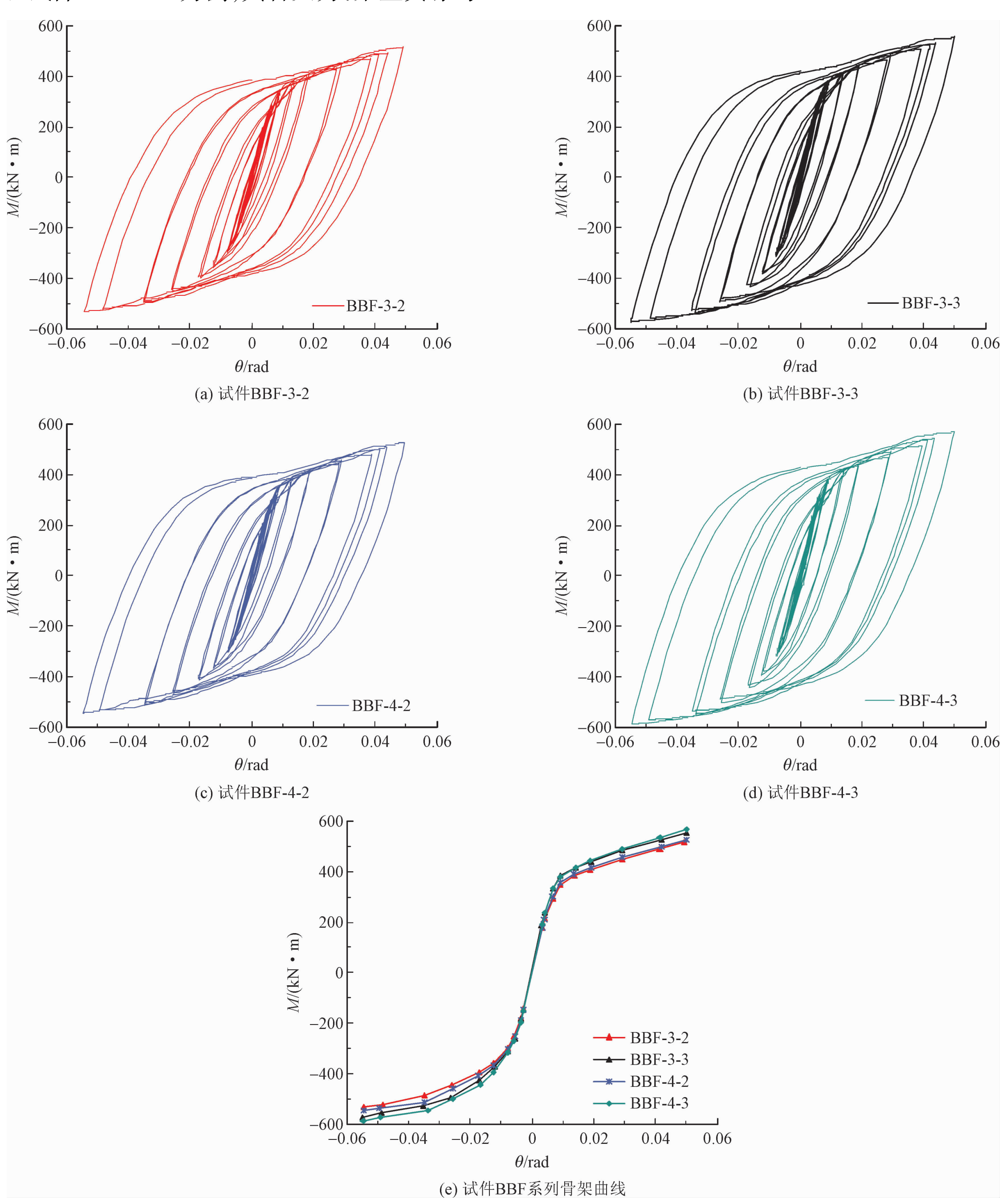


图 15　BBF 系列试件弯矩-转角曲线

Fig. 15　BBF series specimen bending moment-rotation curves

由图 15 可知,在保持梁上下翼缘与 L 型角钢、悬臂梁段横板连接长度不变的情况下,改变梁上、下翼缘螺栓数量对节点的承载力影响较大。与标准试件 BBF-4-3 相比,试件 BBF-3-2 其承载力远远小于

试件 BBF-4-3,差值为 9.42%,可见同时减少梁上、下翼缘螺栓的数量,将显著降低试件的承载力;与 BASE 试件 BBF-4-3 相比,试件 BBF-3-3 其承载与试件 BBF-4-3 仅相差 0.91%,可见保持梁下翼缘螺栓数量不变,减少梁上翼缘与 L 型角钢长肢连接螺栓的数量,对试件的承载力影响较小。与标准试件 BBF-4-3 相比,试件 BBF-4-2 其承载与试件 BBF-4-3 承载力差值为 7.56%,表明保持梁上翼缘螺栓数量不变,减少梁下翼缘与悬臂梁段横板连接的螺栓数量,对降低试件承载力有着明显影响。总体而言,在保持梁上下翼缘与 L 型角钢长肢、悬臂梁段横板连接长度不变的情况下,改变梁上、下翼缘螺栓数量对节点的承载力影响较大。

4 结 论

使用 ABAQUS 软件对 4 个带悬臂梁段拼接的装配式新型梁柱节点进行有限元模型验证和参数扩展分析以及对比有限元分析与试验滞回曲线、骨架曲线,有限元分析(结果)和试验两者结果吻合较好,说明利用 ABAQUS 模拟带悬臂梁段拼接的装配式新型梁柱节点的受力性能具有可行性。通过对节点进行有限元参数拓展分析,以确定各参数变化对节点抗震性能的影响,以期为带悬臂梁段拼接节点提出可行性设计建议。得到如下结论。

1)悬臂梁段加劲肋的数量对节点的抗震性能有一定的影响。带悬臂梁段拼接的装配式节点在设计时,应设置悬臂梁段的加劲肋,以提高节点的抗震性能。

2)节点的受力性能受悬臂梁段横板、耳板两者厚度的影响较小,随着厚度的增加,节点承载力虽有增大,但涨幅很小。因此,该新型装配式梁柱节点受力性能受悬臂梁段横板、耳板厚度的影响较小,在合理范围内选择即可,但是悬臂梁段横板厚度不宜小于梁翼缘厚度,悬臂梁段耳板厚度不宜小于梁腹板厚度。

3)L 型角钢长度、短肢厚度对节点的承载力影响显著。因此,提高 L 型角钢长短肢厚度对提高节点整体的抗震性能有着重要意义。在设计时,L 型角钢长、短肢厚度不应小于梁翼缘厚度,不宜大于柱翼缘厚度。

4)在保持梁上下翼缘与 L 型角钢长肢、悬臂梁段横板连接长度不变的情况下,改变梁上、下翼缘螺栓数量对节点的承载力影响较大。在带悬臂梁段拼接节点设计时,梁上翼缘与 L 型角钢长肢连接的螺栓数量宜大于等于 3 排(6 个),梁下翼缘与悬臂梁段横板连接的螺栓数量宜不少于 3 排(6 个)。

总体来说,在低周往复荷载作用下,改变悬臂梁段加劲肋数量和梁翼缘螺栓数量对节点的抗震性能影响最大,L 型角钢长短肢厚度影响次之,悬臂梁段横板和耳板的厚度对节点性能的影响最小。

参考文献:

[1] GATES W E, MORDEN M. Professional structural engineering experience related to welded steel moment frames following the Northridge earthquake[J]. The structural design of tall buildings, 1996, 5(1): 29-44.

[2] MILLER D K. Lessons learned from the Northridge earthquake[J]. Engineering structures, 1998, 20(4/6): 249-260.

[3] 崔鸿超. 日本兵库县南部地震震害综述[J]. 建筑结构学报, 1996, 17(1): 2-13.
CUI Hongchao. An review of the earthquake damage in southern Hyogo Prefecture, Japan[J]. Journal of building structures, 1996, 17(1): 2-13(in Chinese).

[4] 丁克伟, 刘建华, 马巍, 等. 新型装配式半刚性节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(4): 1-7.
DING Kewei, LIU Jianhua, MA Wei, et al. Experimental study on seismic performances of a new type of fabricated semi-rigid beam-to-column connection[J]. China civil engineering journal, 2021, 54(4): 1-7(in Chinese).

[5] 石永久, 王萌, 王元清. 钢框架不同构造形式焊接节点抗震性能分析[J]. 工程力学, 2012, 29(7): 75-83.
SHI Yongjiu, WANG Meng, WANG Yuanqing. Analysis on seismic behavior of different structural constructions of welded steel frame connections[J]. Engineering mechanics, 2012, 29(7): 75-83(in Chinese).

[6] 杨文秀, 郁有升, 张海宾. 钢框架翼缘加强互形装配式节点力学性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(8): 105-112.
YANG Wenxiu, YU Yousheng, ZHANG Haibin. A study on the mechanical properties of HU-shaped assembly connection strengthened by steel frame flange[J]. Progress in steel building structures, 2021, 23(8): 105-112(in Chinese).

[7] 王萌, 孙毅, 杨璐. 配置低屈服点角钢连接件的钢框架节点损伤控制及优化设计[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(12): 76-89.
WANG Meng, SUN Yi, YANG Lu. Damage control and optimal design of steel frame connection with low yield point angle steel components[J]. Journal of building structures, 2021, 42(12): 76-89(in Chinese).

[8] 陈廷国, 任伟宾, 曲激婷. RBS 节点钢框架设计方法与极限承载力理论研究[J]. 大连理工大学学报, 2020, 60(5): 499-512.
CHEN Tingguo, REN Weibin, QU Jiting. Design method and ultimate bearing capacity study of steel frame structure with RBS con-

nection[J]. Journal of Dalian University of Technology,2020,60(5):499-512(in Chinese).

[9] 张艳霞,李瑞,王路遥,等. 钢框架梁柱加强与削弱并用节点抗震性能研究[J]. 建筑钢结构进展,2014,16(6):22-33.
ZHANG Yanxia,LI Rui,WANG Luyao,et al. Study on seismic behavior of strengthen-weaken beam-column connections in steel frames[J]. Progress in steel building structures,2014,16(6):22-33(in Chinese).

[10] 赵旭冉,郑山锁,张晓辉,等. 新型钢框架焊接节点抗震性能试验与数值分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2020,47(11):56-65.
ZHAO Xuran,ZHENG Shansuo,ZHANG Xiaohui,et al. Experimental and numerical analysis on seismic behavior of a new type of steel frame welded connection[J]. Journal of Hunan University (natural sciences),2020,47(11):56-65(in Chinese).

[11] 李明昊,谭英华,席丰. 几种典型钢框架节点连接性能的有限元仿真分析[J]. 应用力学学报,2020,37(1):301-307.
LI Minghao,TAN Yinghua,XI Feng. Finite element simulation analysis on connections performance of several typical steel frame joints[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(1):301-307(in Chinese).

[12] 茹继平,杨娜,杨庆山. 翼缘削弱型钢框架梁柱节点的性能研究综述[J]. 工程力学,2004,21(1):61-66.
RU Jiping,YANG Na,YANG Qingshan. A review on the seismic performance of steel moment connections with reduced beam sections[J]. Engineering mechanics,2004,21(1):61-66(in Chinese).

[13] 郝际平,孙晓岭,薛强,等. 绿色装配式钢结构建筑体系研究与应用[J]. 工程力学,2017,34(1):1-13.
HAO Jiping,SUN Xiaoling,XUE Qiang,et al. Research and applications of prefabricated steel structure building systems[J]. Engineering mechanics,2017,34(1):1-13(in Chinese).

[14] 王俊,赵基达,胡宗羽. 我国建筑工业化发展现状与思考[J]. 土木工程学报,2016,49(5):1-8.
WANG Jun,ZHAO Jida,HU Zongyu. Review and thinking on development of building industrialization in China[J]. China civil engineering journal,2016,49(5):1-8(in Chinese).

[15] 刘学春,浦双辉,徐阿新,等. 模块化装配式多高层钢结构全螺栓连接节点静力及抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(12):43-51.
LIU Xuechun,PU Shuanghui,XU Axin,et al. Experimental study on static and seismic performance of bolted joint in modularized multi-layer and high-rise prefabricated steel structures[J]. Journal of building structures,2015,36(12):43-51(in Chinese).

[16] 张爱林,郭志鹏,刘学春,等. 带 Z 字形悬臂梁段拼接的装配式钢框架节点抗震性能试验研究[J]. 工程力学,2017,34(8):31-41.
ZHANG Ailin,GUO Zhipeng,LIU Xuechun,et al. Experimental study on aseismic behavior of prefabricated steel-frame-joints with z-shaped cantilever-beam splicing[J]. Engineering mechanics,2017,34(8):31-41(in Chinese).

[17] 曹正罡,杜鹏,李江东,等. 低周往复荷载作用下可变梁高装配式钢框架节点力学性能研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(4):1-8.
CAO Zhenggang,DU Peng,LI Jiangdong,et al. Research on mechanical performance of bolted height adjustable steel beam-to-column connections under low cycle reversed loading[J]. Journal of building structures,2015,36(4):1-8(in Chinese).

[18] 门亦昂,王新武,余永强,等. 装配式钢框架梁柱节点抗震性能研究[J]. 工业建筑,2020,50(3):156-159.
MEN Yiang,WANG Xinwu,YU Yongqiang,et al. Research on seismic behavior of beam-column joints of prefabricated steel frame structures[J]. Industrial construction,2020,50(3):156-159(in Chinese).

[19] 王萌,毕鹏,杨维国,等. 设置低屈服点钢材“结构保险丝”的延性钢框架连接节点受力性能研究[J]. 建筑结构学报,2019,40(11):90-101.
WANG Meng,BI Peng,YANG Weiguo,et al. Study on mechanical behavior of ductile steel frame connection with low yield point steel ‘structural fuse’[J]. Journal of building structures,2019,40(11):90-101(in Chinese).

[20] 黄彬辉,李元齐. 装配式钢结构梁柱节点承载性能研究进展[J]. 结构工程师,2021,37(1):228-238.
HUANG Binhui,LI Yuanqi. A review on the bearing performance of beam-column joints of assembled steel structures[J]. Structural engineers,2021,37(1):228-238(in Chinese).

[21] 李国强,段炼,陆烨,等. H 型钢梁与矩形钢管柱外伸式端板单向螺栓连接节点承载力试验与理论研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(9):91-100.
LI Guoqiang,DUAN Lian,LU Ye,et al. Experimental and theoretical study of bearing capacity for extended endplate connections between rectangular tubular columns and H-shaped beams with single direction bolts[J]. Journal of building structures,2015,36(9):91-100(in Chinese).

[22] 李慎,李容容,李晓蕾,等. 带悬臂梁段连接的装配式梁柱节点拟静力试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2022,42(4):239-249.
LI Shen,LI Rongrong,LI Xiaolei,et al. Quasi-static test of assembled beam-column joints with cantilever connections[J]. Earthquake engineering and engineering dynamics,2022,42(4):239-249(in Chinese).

[23] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备:GB/T 2975—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.

[24] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法:GB/T 228. 1—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010.

(编辑　李坤璐)